Robert Michel

Kompensation von sättigungsbedingten Harmonischen in den Strömen feldorientiert geregelter Synchronmotoren

VIEWEG+TEUBNER RESEARCH

Robert Michel

Kompensation von sättigungsbedingten Harmonischen in den Strömen feldorientiert geregelter Synchronmotoren

Untersuchungen am Beispiel einer permanentmagneterregten Maschine mit Einzelzahnwicklung

VIEWEG+TEUBNER RESEARCH

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dissertation Technische Universität Dresden, 2009

1. Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten © Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Dorothee Koch | Britta Göhrisch-Radmacher

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media. www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg Druck und buchbinderische Verarbeitung: STRAUSS GMBH, Mörlenbach Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier. Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0908-7

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als Entwicklungsingenieur im Bereich der System- und Antriebsentwicklung der Firma Bosch Rexroth Electric Dives and Controls.

Ich möchte allen danken, die zu dem Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Peter Büchner, welcher mir in zahlreichen Gesprächen mit Rat zur Seite stand.

Ebenso dankbar bin ich Herrn Professor Dr.-Ing. Ingo Hahn für die ausgezeichnete fachliche Betreuung und seine Geduld in vielen Konsultationen.

Des Weiteren danke ich Herrn Dipl.-Ing. Alexander Schmitt für seine Unterstützung bei der Implementierung von Software und der Durchführung von Versuchsreihen sowie für viele anregende Diskussionen. Herrn Dipl.-Ing. Matthias Wahler und Frau Kerstin Noack bin ich für ihre Unterstützung in organisatorischen und administrativen Angelegenheiten sehr dankbar. Sie haben maßgeblich zu den äußerst günstigen Rahmenbedingungen während meiner Arbeit beigetragen.

Meinen Diplomanden Herrn Dipl.-Ing. Mathias Schlecht und Herrn Dipl.-Ing. Dennis Hülsmann danke ich für die inspirierende Zusammenarbeit, welche einen bedeutenden Einfluss auf diese Dissertation hatte.

Schließlich danke ich Herrn Dipl.-Ing. Christian Paul, Herrn Dipl.-Ing. Uwe Scheithauer sowie Herrn Dipl.-Ing. Daniel Kanth für ihre konstruktiven Hinweise bezüglich der fachlichen und sprachlichen Aspekte der Arbeit.

Robert Michel

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis IX					
Tal	Tabellenverzeichnis X				
1.	Einl 1.1. 1.2. 1.3.	eitung Motivation und Zielsetzung Aufbau der Arbeit	1 3 3 4		
2.	Mas 2.1. 2.2. 2.3. 2.4. 2.5.	chinenmodell auf Basis eines magnetischen Widerstandsnetzwerkes Einleitung	9 12 12 13 42		
3.	Erw	eiterung des Grundwellenmodells um einen Oberwellenansatz	51		
	3.1. 3.2. 3.3.	Die permanentmagneterregte Synchronmaschine als allgemeiner ohm- scher-induktiver Verbraucher in feldorientierten Koordinaten Erweiterung des allgemeinen Ansatzes	52 55 57		
4.	Reg 4.1. 4.2. 4.3.	elung Stand der aktuellen Regelung	61 62 73		
		schine	115		
5.	Zusa	ammenfassung	119		
6.	Aus	blick	121		
Α.	Reg A.1. A.2.	ularität der Jakobimatrizen Invertierbarkeit von F'_{ξ}	123 123 125		
Lit	Literaturverzeichnis				

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Struktur des Maschinenmodells	13
2.2.	Wirkungspläne der elektrischen und mechanischen Differenzialglei-	
	chungen	16
2.3.	Wirkungsplan des statischen Teilmodells	18
2.4.	Programmablaufplan des Modells	19
2.5.	Überführung der einzelzahnbewickelten Maschine in ein Magnetkreis- modell	20
2.6.	Querschnitt der Rotordurchflutungsverteilung im Luftspalt der Elemen- tarmaschine	22
27		24
2.7.	Vorgleich zwischen Magnetisiorungsdaten von ST37N und Polynoman	24
2.0.	satz für f_{m}	26
2.9	Magnetische Co-Energie	36
2.10	Systemarenzen der Leistungsbilanz	40
2.11	Simulierter und gemessener Verlauf des Drehmoments	44
2.12	Simulation der Längsflussverkettung	46
2.13	Simulation der Querflussverkettung	46
2.14	.Simulation der Längsinduktivität	47
2.15	Simulation der Querinduktivität	47
2.16	Simulation der Koppelinduktivität	48
2.17	Simulation der rotorlagebezogenen Längsflussverkettungsänderung	48
2.18	. Simulation der rotorlagebezogenen Querflussverkettungsänderung	49
3.1.	Einzelzahnbewickelte Maschine als Drehstromverbraucher	53
3.2.	Wirkungsplan des erweiterten Modells	59
4.1.	Synchronmaschine mit Wechselrichter	62
4.2.	Kaskadenstruktur der Regelung	63
4.3.	Wirkungsplan der aktuellen Stromregelkreise	64
4.4.	Bereich des möglichen Querstroms in Abhängigkeit der Drehzahl	69
4.5.	Gemessene Stromverläufe beim Reversieren	71
4.6.	Längsstromverlauf bei Konstantfahrt mit konstantem Querstromsollwert	72
4.7.	Querstromverlauf bei Konstantfahrt mit konstantem Querstromsollwert .	72
4.8.	Wirkungsplan des grundwellenentkoppelten zeitdiskreten Modells mit	
	Regler und Störgrößenkompensationsfilter	74

4.9.	Wurzelortskurve eines in Abbildung 4.8 dargestellten Regelkreises mit Nominalparametern und nachgeführtem Filter im positiven, zulässigen	
	Drehzahlbereich	76
4.10	Aufbau des Simulationsmodells	78
4.11	Simulierter Längsstrom ohne und mit Störgrößenkompensationsfilter bei konstanter Drehzahl und konstantem Sollstrom	80
4.12	Simulierter Querstrom ohne und mit Störgrößenkompensationsfilter bei konstanter Drehzahl und konstantem Sollstrom	80
4.13	Gemessener Längsstrom ohne und mit Störgrößenkompensationsfilter	82
4.14	Gemessener Querstrom ohne und mit Störgrößenkompensationsfilter	02
	bei konstanter Drehzahl und konstantem Sollstrom	83
4.15	Simulierte Sprungantwort der stromgeregelten Maschine mit und ohne	
	Störgrößenkompensationsfilter bei konstanter Drehzahl	84
4.16	Wirkungsplan der zeitdiskreten Regelung mit Grundwellenentkopplung	
	und kennfeldbasierter Störgrößenvorsteuerung	87
4.17	Prüfstand zur Kennfeldermittlung	89
4.18	Messzustände	90
4.19	Transponierte Direktform II der Störgrößenkompensationsfilter	90
4.20	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungen im Längszweig	
	bei konstanter Drehzahl und Querstromsollwert $I_{a.soll} = 26.3 \text{ A}$	95
4.21	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungen im Querzweig	
	bei konstanter Drehzahl und Querstromsollwert $I_{q,soll} = 26.3 \text{ A} \dots$	96
4.22	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungen im Querzweig	
	bei konstanter Drehzahl und Querstromsollwert $I_{q,soll} = 21 \text{ A} \dots$	97
4.23	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungen im Längszweig	
	in Abhängigkeit des Querstroms und der Drehzahl	98
4.24	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungen im Querzweig	
	in Abhängigkeit des Querstroms und der Drehzahl	99
4.25	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungsphasenlagen	
	nach Beseitigung der Unstetigkeiten	100
4.26	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungen im Längszweig	
	in Abhängigkeit des Querstroms	100
4.27	Auswertung der simulierten Kompensationsspannungen im Querzweig	
	in Abhängigkeit des Querstroms	101
4.28	Auswertung der gemessenen Kompensationsspannungen im Längszweig	
	in Abhängigkeit des Querstroms	103
4.29	Auswertung der gemessenen Kompensationsspannungen im Querzweig	
	in Abhängigkeit des Querstroms	104
4.30	Wirkungsplan der grundwellenentkoppelten, zeitdiskreten Regelung mit	
	Ausgleichsfunktionen statt Kennfeldern und Störgrößenvorsteuerung	106
4.31	Messtechnisch ermittelte Kennlinie KF_{d1} der Phasenlage γ_{dS3} im Ver-	
	gleich zu Ausgleichspolynomen ersten und neunten Grades	108

10
11
13
14

Tabellenverzeichnis

2.1.	Analogie zwischen elektrischem Netzwerk und magnetischem Netzwerk	20
4.1.	Stützstellen der simulierten Kennlinie KF_{q2} (A_{qS3}) und der gemessenen	
	Kennlinie KF_{d1} (γ_{dS3})	106
4.2.	Koeffizienten des Ausgleichspolynoms f_{a2} für simulierte Stützstellen	107
4.3.	Koeffizienten des Ausgleichspolynoms f_{d1} für gemessene Stützstellen .	109

1. Einleitung

Als einen elektrischen Antrieb bezeichnet man in der Servotechnik ein System, das aus einem leistungselektronischen Stellglied, einem elektromechanischen Energiewandler und den zum Betrieb des Wandlers nötigen Sensoren und Reglern besteht. Solche Antriebe stellen heutzutage einen notwendigen und in der Anzahl wachsenden Bestandteil in den meisten industriellen Anlagen dar. Dabei stehen nicht nur technische, sondern auch ökonomische Aspekte im Fokus der Konstrukteure. Eine wichtige Rolle in der Klasse der elektrischen Antriebe spielen die permanentmagneterregten Synchronmaschinen. Bei Servoantrieben sind sie fast ausschließlich als dreiphasige Drehstrommaschinen ausgeführt und werden durch einen Wechselrichter mit Spannungen und Strömen versorgt. Gerade die Fortschritte in den Werkstoffwissenschaften bei der Entwicklung leistungsstarker und kostengünstiger Permanentmagnete [60–62] haben der Verbreitung dieser Maschinen weiteren Auftrieb verliehen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf umrichtergespeiste Synchronmaschinen, welche durch Permanentmagnete erregt werden.

Ein Aspekt, welcher für den Betrieb eines elektrischen Servoantriebs typisch ist, ist die Fahrt mit kurzzeitiger Überlast. Limitierend für das Drehmoment, welches eine Synchronmaschine dauerhaft zu leisten vermag, ist die thermische Belastbarkeit. Hohe Drehmomente fordern hohe Ströme, was unter anderem durch den ohmschen Widerstand der Wicklungen zur Erwärmung führt. Gerade die isolierende Beschichtung der Wicklung, aber auch Richtlinien zum Brandschutz, begrenzen die zulässige Temperatur der Wicklungen und des Motorgehäuses. Es ist allerdings möglich, für kurze Zeit den Bereich des zulässigen Dauerstroms bei einer kalten Wicklung zu verlassen. Dabei wird die in Wärme umgewandelte Verlustleistung der Maschine nicht ausreichend an die Umgebung abgeführt und die Wicklungstemperatur steigt schnell an. Wichtig dabei ist, dass dieser hohe Strom nur solange gehalten wird, wie die Wicklungstemperatur noch zulässig ist. Der kurzzeitige Überlaststrom einer Servomaschine kann um ein Vielfaches höher liegen als der zulässige Dauerstrom. Das Bewegungsprofil von Servomotoren sieht oftmals kurze Beschleunigungs- und Belastungsphasen vor. um Stellbewegungen auszuführen. Darauf folgen Phasen, ohne oder nur mit geringer Belastung, während denen sich die Maschine abkühlen kann. Auf diese Weise kann man mit relativ kleinen Maschinen, welche nur ein geringes Dauerdrehmoment liefern,

R. Michel, Kompensation von sättigungsbedingten Harmonischen in den Strömen feldorientiert geregelter Synchronmotoren, DOI 10.1007/978-3-8348-9395-6_1, © Vieweg+Teubner IGWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009 trotzdem die geforderten Maximalmomente kurzzeitig liefern. Es ist unökonomisch, das Dauerdrehmoment bei solchen Profilen nach dem nur kurzzeitig benötigten Maximalmoment zu richten, da damit wesentlich größere und teurere Maschinen benötigt werden.

Auch die leistungselektronischen Stellglieder unterliegen Begrenzungen bezüglich der Ströme, welche sie der Maschine maximal zur Verfügung stellen können. Wegen der geringen Wärmekapazität der schaltenden Halbleiter-Bauelemente und verschiedener physikalischer Effekte auf atomarer Ebene in den Halbleitern gibt es bei den Wechselrichtern eine geringe Möglichkeit der kurzzeitigen Überlastbarkeit. Der maximale Strom liegt nur geringfügig höher als der zulässige Dauerstrom. Bei der Abstimmung zwischen Stellglied und Maschine wird bei der Auslegung eines Servoantriebs aus Kostengründen folglich das Stellglied so konstruiert, dass sein maximaler Strom wenig höher ist, als der mögliche Überlaststrom der Maschine. Auf diese Weise kann die Maschine voll ausgefahren werden, während für das Stellglied eine Sicherheitsreserve verbleibt. Eine Überdimensionierung des Stellgliedes würde die Kosten des Antriebs erhöhen.

In den letzten Jahren hat sich unter den Synchronmaschinen der Servoantriebe neben der typischen verteilten Wicklung eine neue Art der Statorwicklung durchgesetzt, welche bislang fast ausschließlich in anderen Bereichen, wie Lüftermotoren, Generatoren und Großantrieben, zu finden war. Dieses neue Wickelschema ist die Einzelzahnwicklung oder auch konzentrierte Wicklung. Einer seiner Vorteile ist gerade bei hoher Polpaarzahl ein wesentlich kürzerer Wickelkopf, was zu einem kürzeren Bauraum und Kupfereinsparungen bei den Wicklungen und somit zu geringeren Rohstoffkosten führt. Ein weiterer Vorteil konzentrierter Wicklungen ist bei entsprechender Fertigung ein höherer Kupferfüllfaktor, da die Wicklungen nicht in das Blechpaket des Stators eingezogen werden müssen, sondern die Zähne erst einzeln bewickelt und anschlie-Bend zum Stator zusammengefügt werden können. Damit wird eine bessere Auslastung der Maschine möglich. Nachteilig bei dieser Art von Wicklung ist das verstärkte Auftreten von Oberwellen in den Flussverkettungen. Dieser Effekt kann wegen der Art der Fertigung nicht durch eine Schrägung der Statornuten entschärft werden. Es gibt verschiedene Bestrebungen, diese Oberwellen konstruktiv zu verringern. Unabhängig von diesen Maßnamen zeigen die einzelzahnbewickelten Maschinen im Gegensatz zu Maschinen mit vergleichbaren Bauarten und mit verteilten Wicklungen eine höhere Neigung zur lokalen magnetischen Sättigung im Überlastbereich. Diese Sättigung verzerrt das Luftspaltfeld, welches dann zu Oberwellen in den Flussverkettungen führt. Durch die Rotation der Maschine wirkt die räumlich verzerrte Feldkurve als zeitlicher Spannungsverlauf mit höheren Harmonischen. Wie im Laufe dieser Arbeit gezeigt werden wird, führen bei einer rotierenden Maschine die (räumlichen) Oberwellen in den

Flussverkettungen zu (zeitlichen) Oszillationen in den Maschinenströmen, welche nur unzureichend durch die bestehende Regelung beherrscht werden können.

1.1. Motivation und Zielsetzung

Im Überlastbetrieb permanentmagneterregter Synchron-Servomaschinen treten in den zu regelnden elektrischen Strömen Oszillationen auf. Bei vielen Maschinen sind die Amplituden dieser Schwingungen gering und sind deshalb nicht störend. In Maschinen, wie zum Beispiel in einigen mit Einzelzahnwicklung, können diese Stromoszillationen bei entsprechend hoher Überlastung Amplituden annehmen, welche die leistungselektronischen Stellglieder gefährden. Der Strombetrag kann durch diesen Effekt die knapp dimensionierte Reserve des Wechselrichters verlassen und die Bauelemente schädigen oder zu einer Sicherheitsabschaltung führen. Weiterhin führen diese Oszillationen, wie später gezeigt wird, zu zusätzlichen ohmschen Leistungsverlusten. Die heutigen Stromregler vermögen es nur unzureichend, die Oszillationen im Überlastbereich auszuregeln.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Ursache für die Oszillationen in den Maschinenströmen und die Entwicklung von regelungstechnischen Methoden zur Glättung der Ströme. Dafür soll ein Maschinenmodell entworfen werden, welches diese Ursachen abbildet und für die Simulation dynamischer Vorgänge als Prozessmodell im Zusammenwirken mit Regelungen geeignet ist. Regelverfahren, welche in der Simulation zu einer Glättung der Maschinenströme führen, werden an einem Versuchsstand mit einer realen Maschine getestet und können bei Erfolg zu Standardfunktionen in Regelgeräten weiterentwickelt werden.

1.2. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Teile:

Im ersten Teil (Kapitel 2) wird der Entwurf eines für die Verhaltenssimulation geeigneten Modells einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Einzelzahnwicklung auf Basis eines magnetischen Widerstandsnetzwerkes durchgeführt. Über das Widerstandsnetzwerk können magnetische Sättigungseffekte in verschiedenen Bereichen der Maschine abgebildet werden. Durch eine entsprechende Wahl der Ansätze und einen speziell auf die Struktur des Netzwerks angepassten iterativen Lösungsalgorithmus kann das die Eigenschaften des Netzwerks beschreibende Gleichungssystem sehr schnell gelöst werden. Damit eignet es sich nicht nur als Grundlage zur Untersuchung stationärer Zusammenhänge (Abschnitt 2.5), sondern darüber hinaus als Prozessmodell bei der Verhaltenssimulation dynamischer Vorgänge in Kombination mit Regelschleifen. Dies ist der erste wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit.

Im zweiten Teil der Arbeit (Kapitel 3) wird ausgehend von den Simulationsergebnissen (Abschnitt 2.5) des Widerstandsnetzwerks das aus der Literatur [2–9] bekannte Grundwellenmodell einer Synchronmaschine in feldorientierten Koordinaten um einen Oberwellenansatz erweitert, welcher das Auftreten von sättigungsbedingten Stromoszillationen mit dem sechsfachen der elektrischen Maschinendrehzahl (sechste Harmonische) in der feldorientierten Regelung erklärt. Diese Erweiterung des Grundwellenmodells stellt den zweiten wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit dar.

Im dritten Teil (Kapitel 4) werden ausgehend vom Oberwellenansatz zwei aufeinander aufbauende Stromregelungskonzepte entworfen. Beide Konzepte stellen im eigentlichen Sinne eine Erweiterung der bereits bekannten Stromregler dar. Der erste Entwurf enthält zwei zeitdiskrete Filter, welche eine nahezu vollständige Kompensation der sechsten Harmonischen in den Maschinenströmen im stationären Betrieb ermöglichen. Das zweite Konzept eliminiert durch Vorsteuerung wirkungsvoll die Stromoszillationen sowohl im stationären als auch im dynamischen Betrieb. Durch Simulations- und Messergebnisse wird die Funktion beider Regler belegt. Weiterhin wird gezeigt, dass die Glättung der Maschinenströme zu einer geringfügigen Verringerung der ohmschen Verlustleistung führt. Diese Stromregelungskonzepte stellen den dritten wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit dar.

1.3. Stand der Technik

1.3.1. Modelle zur Simulation elektrischer Maschinen

In der Literatur werden verschiedene Ansätze genannt, um das elektrische und das mechanische Verhalten von Synchronmaschinen zu beschreiben. Der klassische und bekannteste Ansatz ist die Beschreibung durch ein Differenzialgleichungssystem für das elektrische Verhalten und eine algebraische Gleichung zur Berechnung des Drehmoments. Dieses Modell, wie es in [2–9] hergeleitet und beschrieben wird, kann direkt zum Reglerentwurf (siehe Abschnitt 1.3.2) verwendet werden. Es enthält einige Vereinfachungen bezüglich magnetischer Linearität des Maschinenmaterials und Sinusförmigkeit des Luftspaltfeldes. In [15] wird zusätzlich zum Grundwellenmodell der Einfluss von höheren Harmonischen im Luftspaltfeld berücksichtigt. Da in diesem Mo-